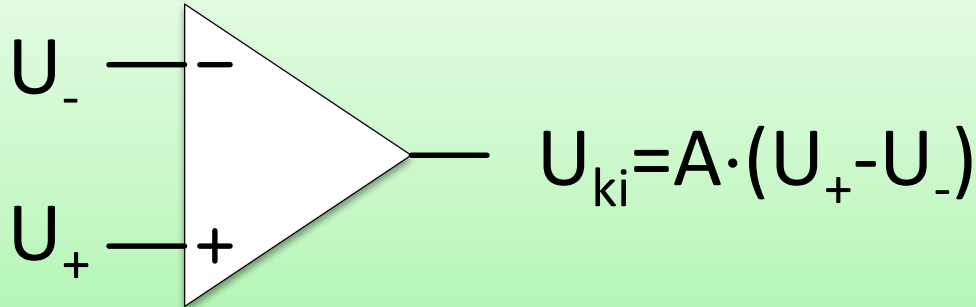


Gingl Zoltán, Szeged, 2017.

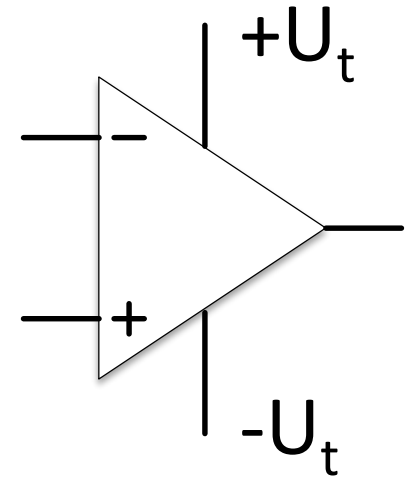
Műveleti erősítők

Műveleti erősítők

Alapvető működés: feszültségerősítés



- ▶ Van tápfeszültsége is: $+U_t$, $-U_t$
- ▶ Pozitív és negatív jelek is
- ▶ Tranzisztor: β , ME: A
- ▶ Jó: β nagy, A nagy
- ▶ ME: **A igen nagy, 10^5 vagy akár több!**
- ▶ Ideális: A végtelen



Negatív visszacsatolás

- ▶ A kimenetet visszakötjük a bemenetre
 - ▶ ha a bemenetet változtatjuk, a kimenet követi
 - ▶ minél nagyobb A, annál pontosabban!
 - ▶ a kimeneti érték szabályozása ez (P-szabályzó)
- ▶ **Szabályozás**
 - ▶ mérjük az eltérést a kívánttól
 - ▶ beavatkozunk, hogy az eltérés kicsi legyen
 - ▶ **vezérlés**: nem mérjük az eltérést, csak ismerjük az összekötő képletet – például földelt emitteres erősítő

Ideális ME

- ▶ A bemenetekbe áram nem folyik
- ▶ A kimenet ideális feszültséggenerátor
- ▶ Az erősítés végtelen nagy

Valódi ME

- ▶ Ideális erősítőből egyféle elég lenne
- ▶ Valódi erősítők
 - ▶ Különféle eltérések
 - ▶ Osztályozás, sokféle erősítő
 - ▶ Gyenge, átlagos, jó értékek
 - ▶ Alkalmazás szempontjából optimális erősítő kiválasztása

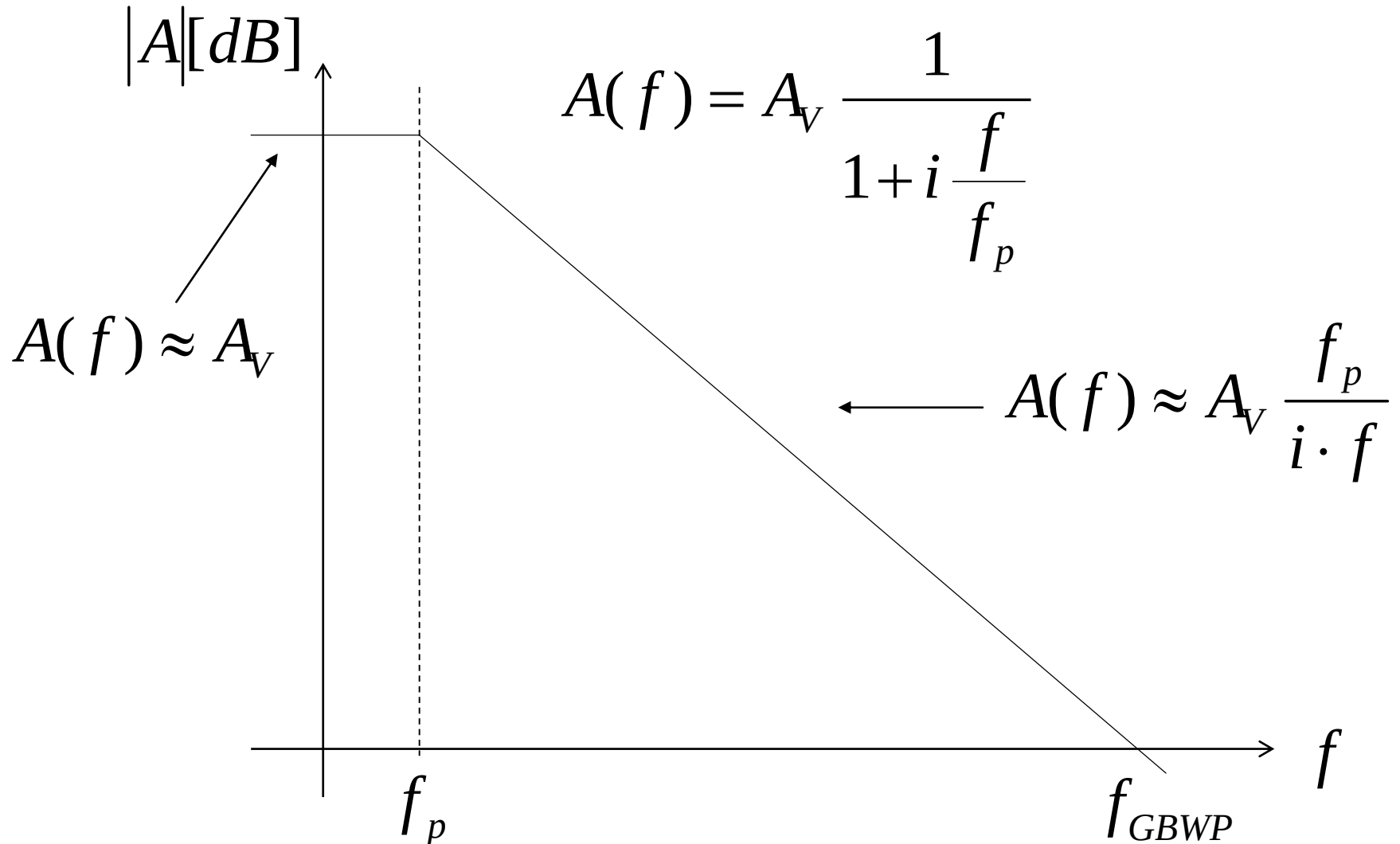
Műveleti erősítők paraméterei

Nyílthurkú erősítés

Nyílthurkú erősítés

- ▶ Open-loop gain
- ▶ Large signal voltage gain
- ▶ Ideális esetben végtelen
- ▶ Frekvenciafüggő

A nyílthurkú erősítés frekvenciafüggő

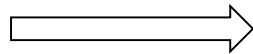


f_{GBWP} – erősítés sávszélesség szorzat

$$|A(f_{GBWP})| = 1$$

$$A_V \frac{f_p}{f_{GBWP}} = 1$$

$$f_p = \frac{f_{GBWP}}{A_V}$$

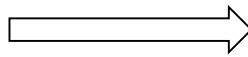


$$A(f) = A_V \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_p}}$$

$$A(f) = A_V \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}} A_V}$$

f_{GBWP} – erősítés sávszélesség szorzat

$$|A(f)| \approx A_V \frac{f_p}{f}$$



$$f_p = \frac{f_{GBWP}}{A_V}$$

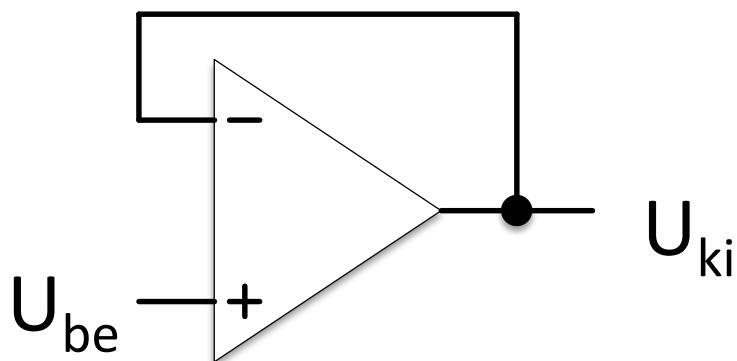
$$|A(f)| \approx \frac{f_{GBWP}}{f}$$

$$\boxed{|A(f)| \cdot f \approx f_{GBWP}}$$

A véges nyílthurkú erősítés hatása

- ▶ Visszacsatolt erősítő: szabályozás
- ▶ Korlátozott pontosságú szabályozás
 - ▶ Erősítéshiba
 - ▶ kapcsolások?
 - ▶ Frekvenciafüggés?

Feszültségkövető



$$U_{ki}(f) = A \cdot (U_{be}(f) - U_{ki}(f))$$

$$\frac{U_{ki}(f)}{A(f)} = U_{be}(f) - U_{ki}(f)$$

$$U_{ki}(f) + \frac{U_{ki}(f)}{A(f)} = U_{be}(f)$$

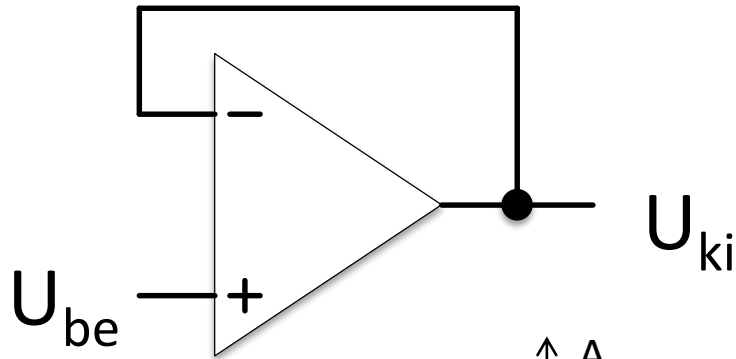
$$\frac{U_{ki}(f)}{U_{be}(f)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A(f)}}$$

Átviteli függvény

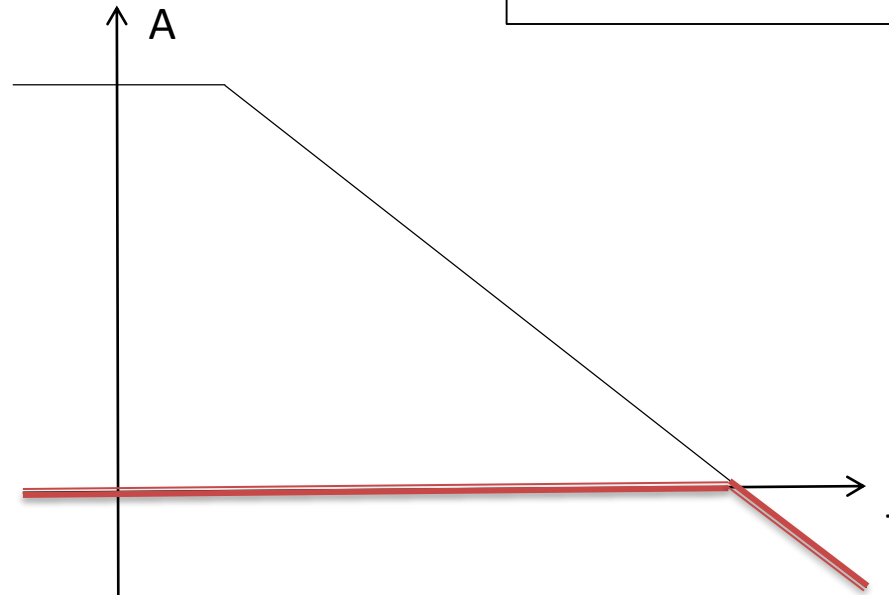
$$G(f) = \frac{1}{1 + \frac{1}{A(f)}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A_V \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}} A_V}}}$$

$$G(f) = \frac{1}{1 + \frac{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}} A_V}{A_V}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A_V} + i \frac{f}{f_{GBWP}}} \approx \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}}}$$

Feszültségkövető: sáv szélesség = f_{GBWP}



$$\frac{U_{ki}(f)}{U_{be}(f)} = \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}}}$$



Feszültségkövető: erősítéshiba – δ

$$\frac{U_{ki}(f)}{U_{be}(f)} = \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}}}$$

$$\delta = 1 - \left| \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}}} \right| = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{GBWP}} \right)^2}}$$

$$\delta \approx \frac{1}{2} \left(\frac{f}{f_{GBWP}} \right)^2$$

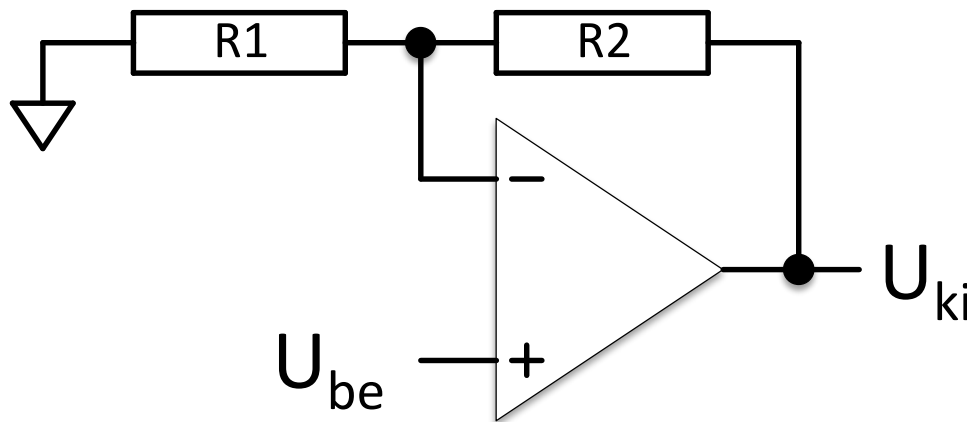
$$\delta \approx \frac{1}{2} \left(\frac{f}{f_{GBWP}} \right)^2, \quad f \ll f_{GBWP}$$

Nem-invertáló erősítő

$$U_{ki}(f) = A \cdot \left(U_{be}(f) - U_{ki}(f) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

β : visszacsatolási tényező
 $1/\beta$: erősítés



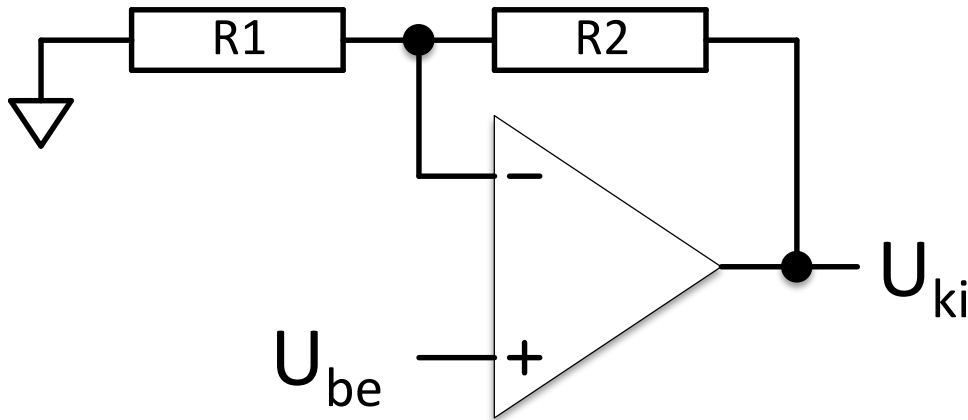
$$\frac{U_{ki}(f)}{U_{be}(f)} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot A(f)}}$$

Átviteli függvény

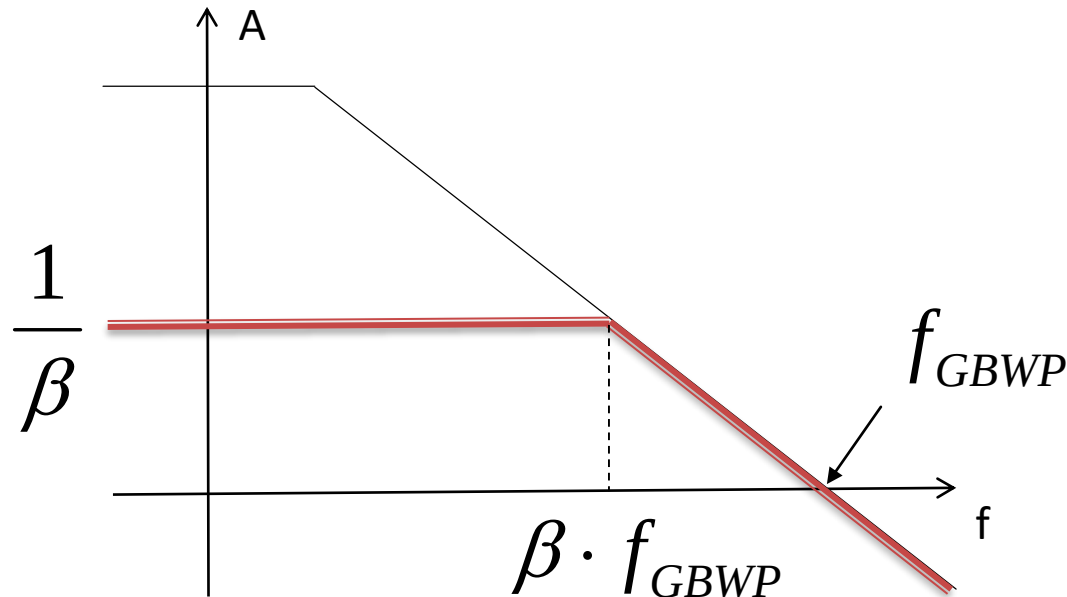
$$G(f) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot A(f)}} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot A_V \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}} A_V}}}$$

$$G(f) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + i \frac{f}{f_{GBWP}} A_V \frac{1}{1 + \frac{f_{GBWP}}{\beta \cdot A_V}}} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot A_V} + i \frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}}} \approx \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + i \frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}}}$$

Nem-invertáló erősítő: sávszélesség = βf_{GBWP}



$$\frac{U_{ki}(f)}{U_{be}(f)} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + i \frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}}}$$



Erősítéshiba – δ

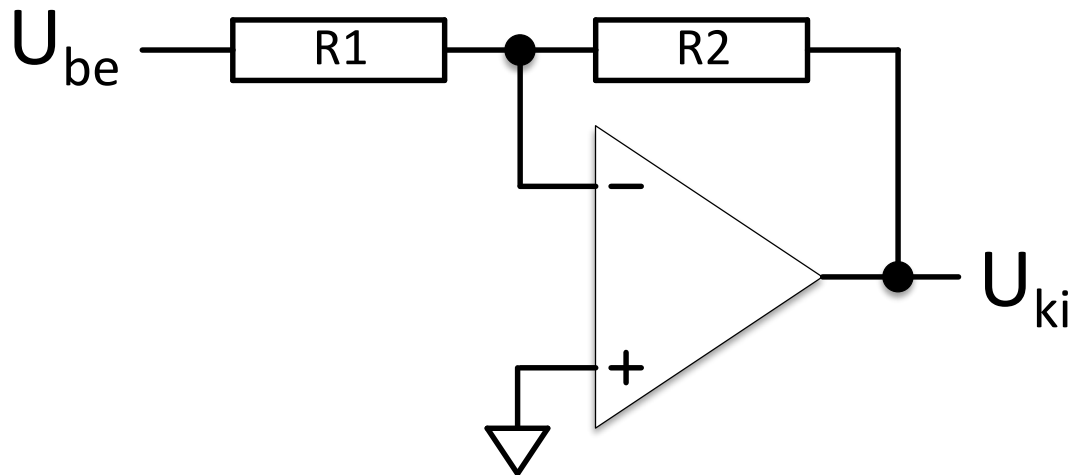
$$\frac{U_{ki}(f)}{U_{be}(f)} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + i \frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}}}$$

$$\delta = 1 - \left| \frac{1}{1 + i \frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}}} \right| = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}} \right)^2}}$$

$$\delta \approx \frac{1}{2} \left(\frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}} \right)^2$$

$$\delta \approx \frac{1}{2} \left(\frac{f}{\beta \cdot f_{GBWP}} \right)^2, \quad f \ll \beta \cdot f_{GBWP}$$

Invertáló erősítő?

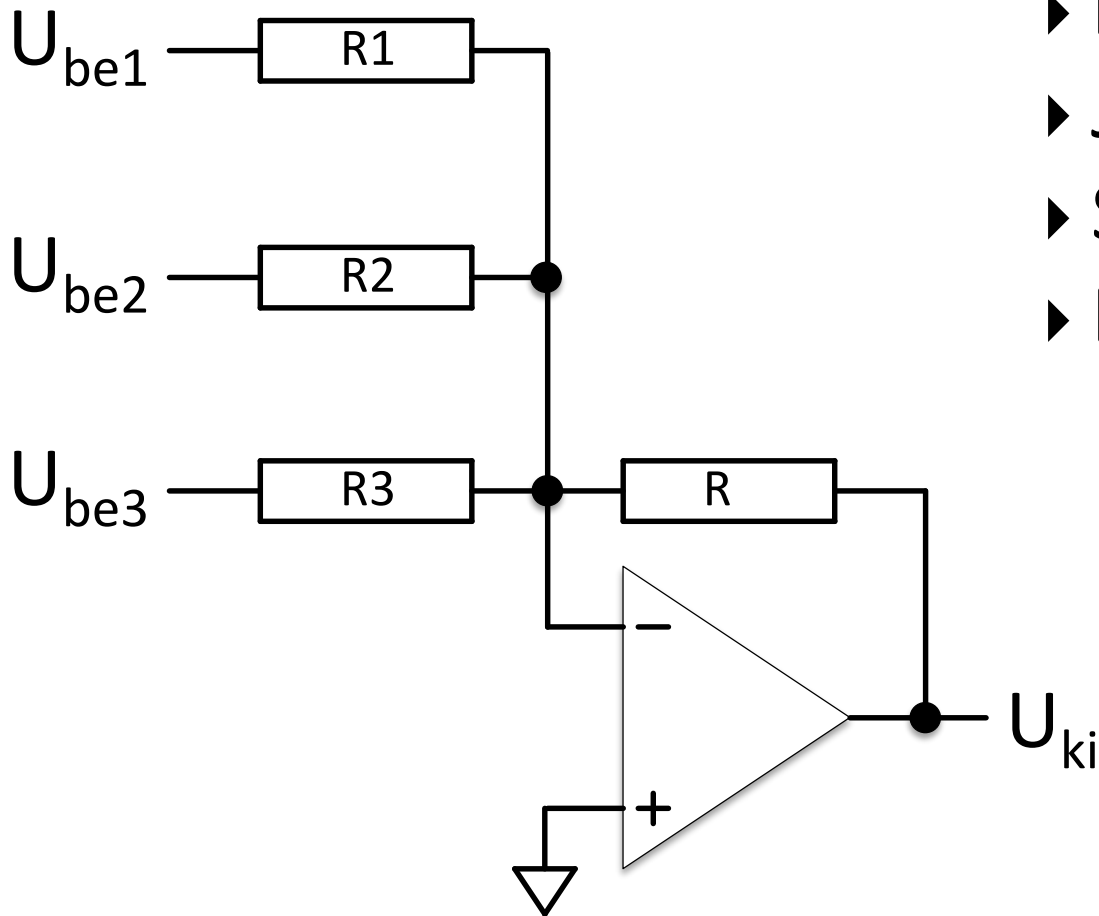


- ▶ A műveleti erősítő „számára” ez ugyanaz a kapcsolás! (szuperpozíció tétele)
- ▶ Bár U_{be} erősítése $-R_2/R_1$, a műveleti erősítő most is ugyanolyan visszacsatolási aránnyal dolgozik.

Erősítések

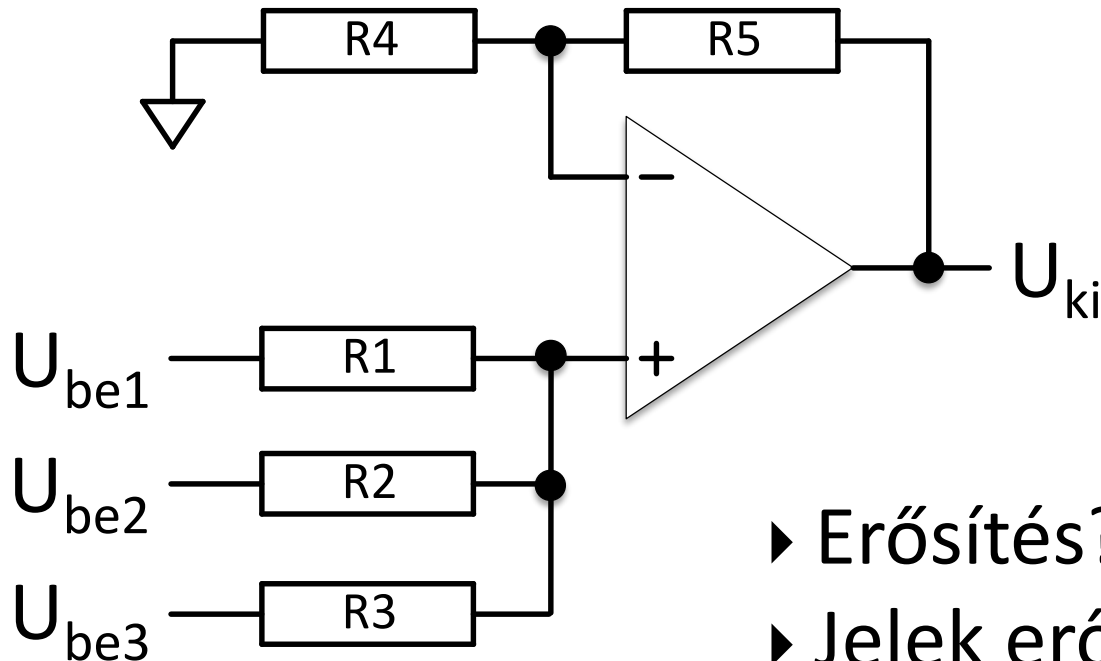
- ▶ A műveleti erősítése mindig a visszacsatolási tényező reciproka ($1/\beta$)
- ▶ A sávszélesség mindig $\beta \cdot f_{GBWP}$
- ▶ A jelerősítés ettől különböző lehet
- ▶ Több bemenő jel is lehet különböző erősítéssel
 - ▶ összeadó
 - ▶ kivonó

Összegző erősítő



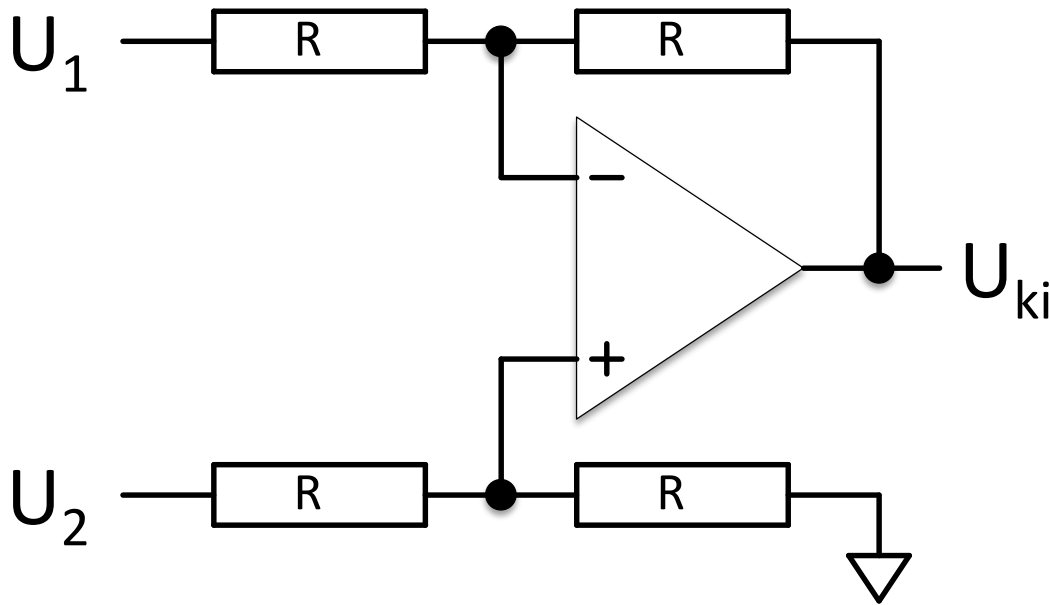
- ▶ Erősítés?
- ▶ Jelek erősítése?
- ▶ Sávszélesség?
- ▶ Erősítés hibája?

Neminvertáló összegző erősítő



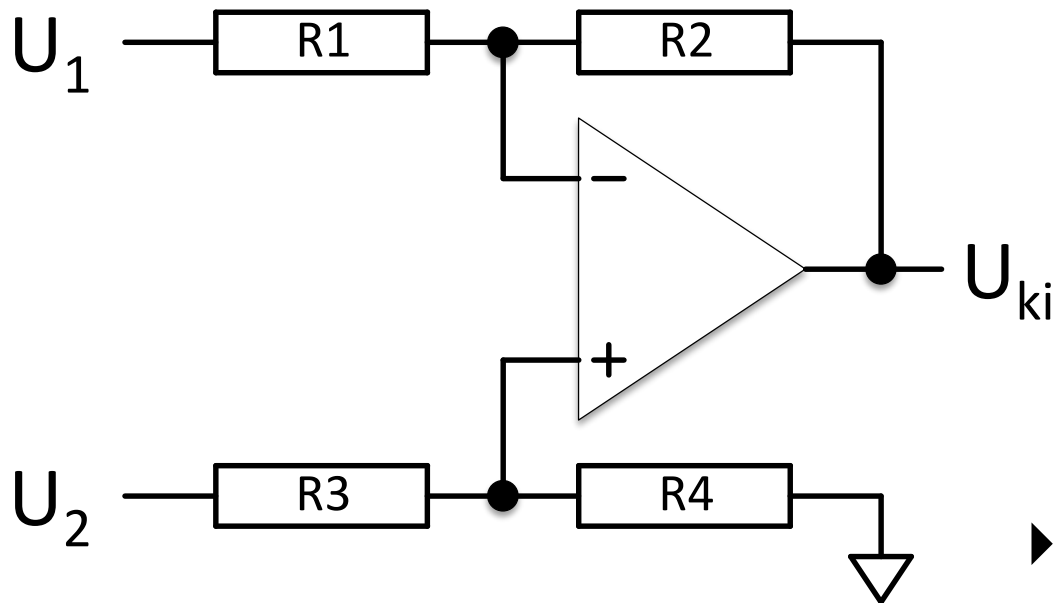
- ▶ Erősítés?
- ▶ Jelek erősítése?
- ▶ Sávszélesség?
- ▶ Erősítés hibája?

Differenciálerősítő (különbségképző)



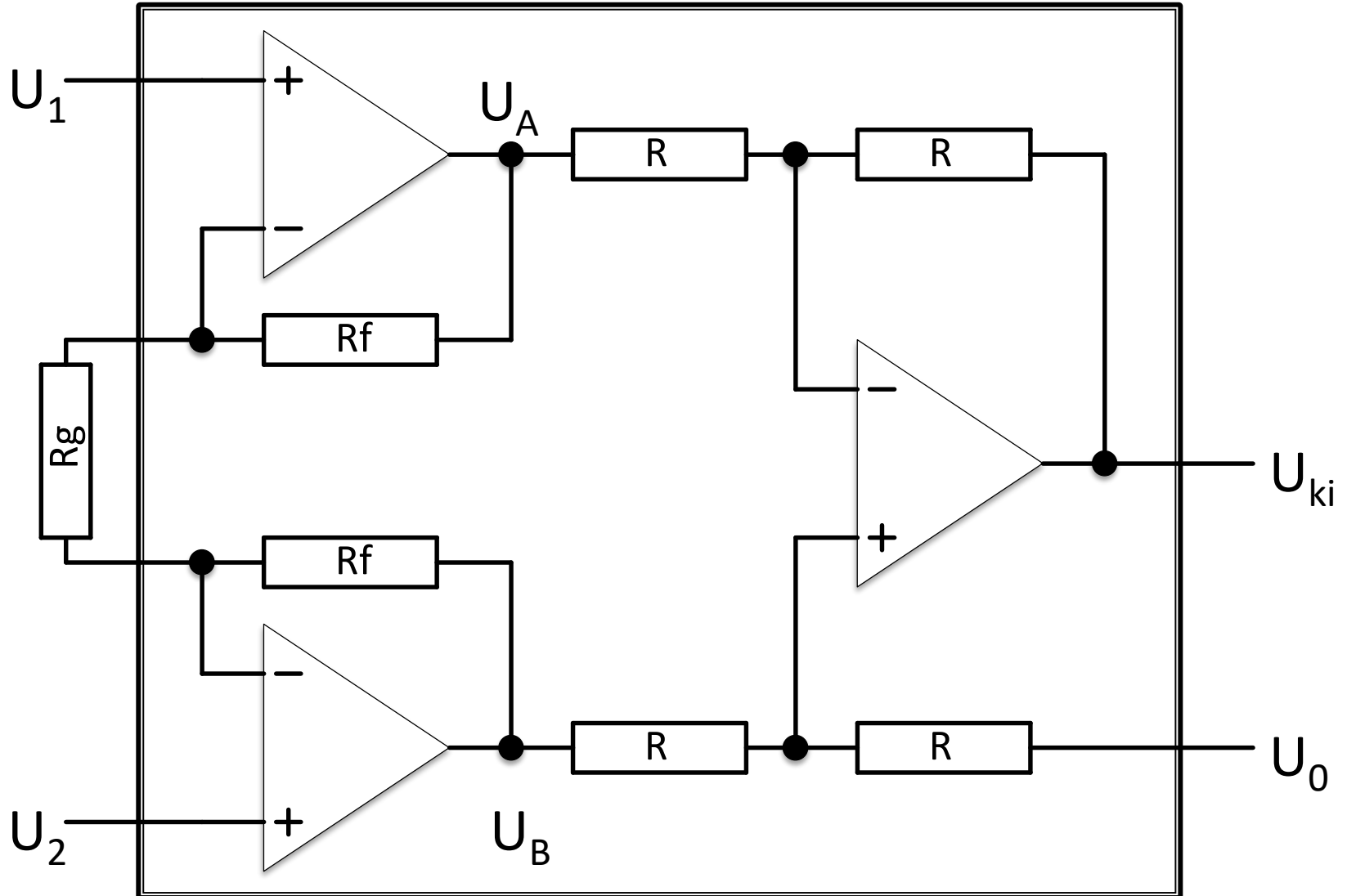
- ▶ Erősítés?
- ▶ Jelek erősítése?
- ▶ Sávszélesség?
- ▶ Erősítés hibája?

Differenciálerősítő (különbségképző)



- ▶ Erősítés?
- ▶ Jelek erősítése?
- ▶ Sávszélesség?
- ▶ Erősítés hibája?

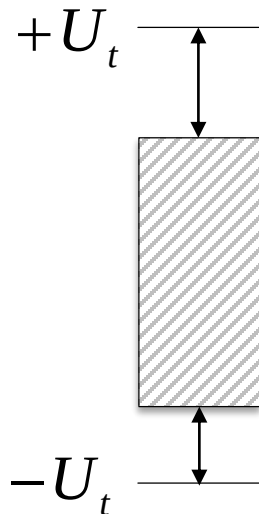
Műszererősítő?



Bemeneti jellemzők

Jeltartomány

- ▶ Input voltage range
- ▶ A bemeneti feszültségek tartománya korlátos
- ▶ Általában a tápfeszültségek közötti:
 - ▶ $-U_t < U < +U_t$

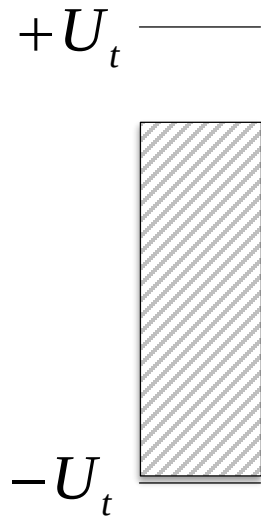


- aszimmetrikus
- pár mV-tól 1-2 Voltig terjedhet
- típustól függ

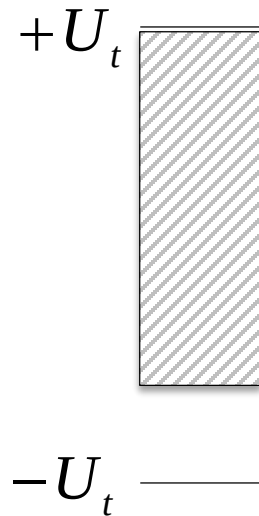
További tipikus esetek: táphoz közeli értékek

- ▶ Akár pár mV, sőt, kicsit meg kívül is eshet a tápon

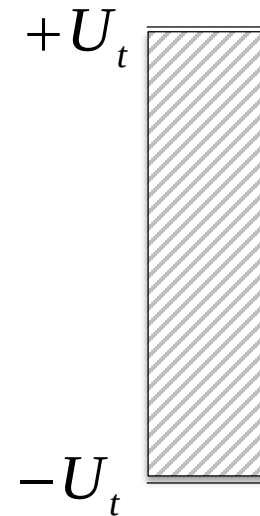
Single supply



Single supply

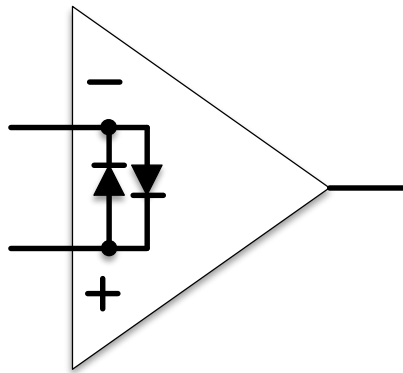


Rail-to-rail



A bemenetek közti különbség is korlátos!

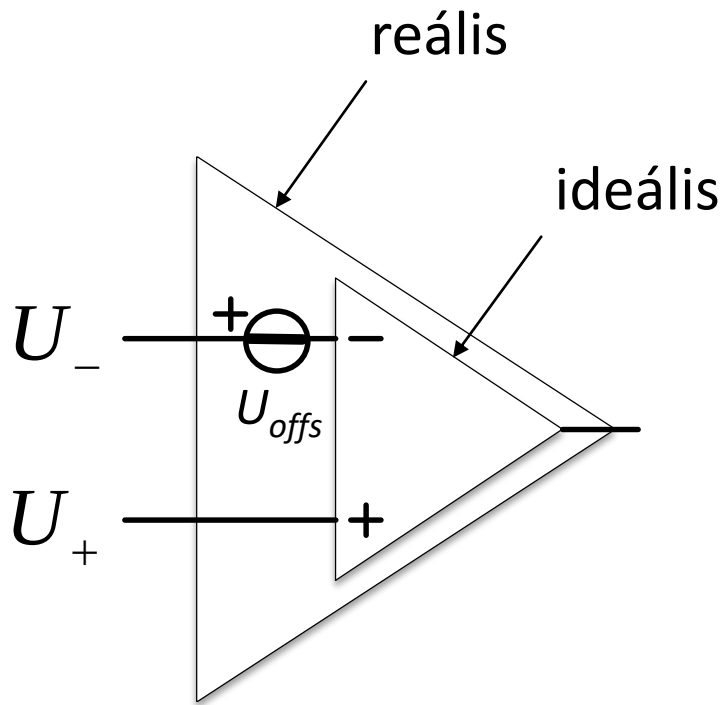
- ▶ U_+ és U_- eleve korlátos, így a különbségük is
- ▶ Gyakran diódák vannak köztük:
 - ▶ Azaz nyitófeszültségnyi lehet csak a különbség
 - ▶ Nem gond, ha negatív visszacsatolás van
 - ▶ Nem használható komparátorként



Offszetfeszültség

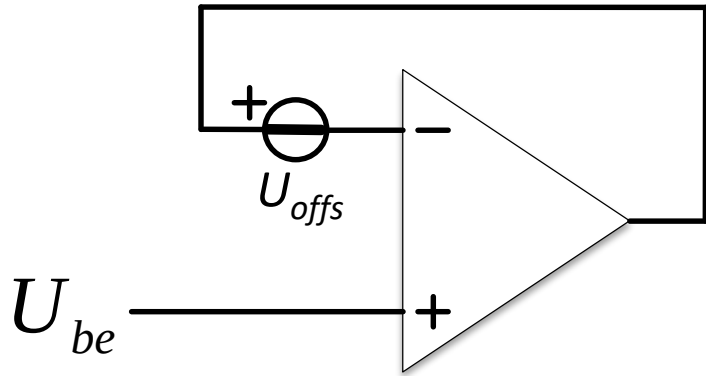
Offszetmodell

- ▶ Angolul: input offset voltage
- ▶ Nem nulla bemenet esetén nulla a kimenet
- ▶ Ok: kicsit aszimmetrikus bemenetek



$$U_{ki} = A \cdot (U_+ - U_- + U_{offs})$$

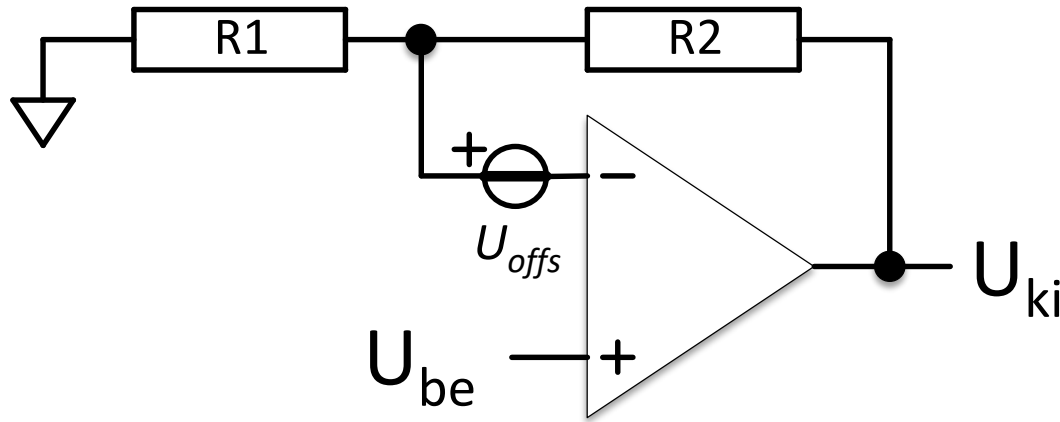
Követő



$$U_{ki} - U_{offs} = U_{be}$$

$$U_{ki} = U_{be} + U_{offs}$$

Nem-invertáló erősítő



$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U_{offs} = U_{be}$$

$$U_{ki} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{be} + \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{offs}$$

$$U_{ki,offs} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{offs}$$

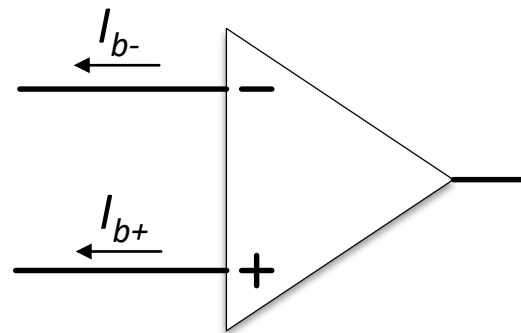
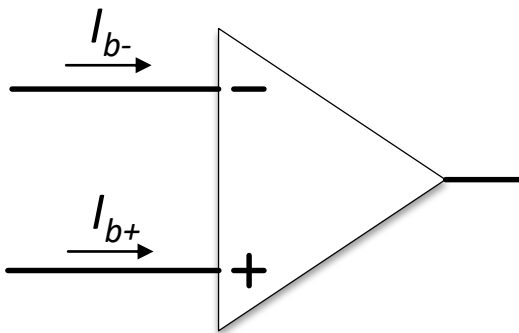
Más kapcsolások?

- ▶ Invertáló, összegző, különbségképző, ...
- ▶ Az offszetfeszültség erősítése minden kapcsolat esetén $1/\beta$!

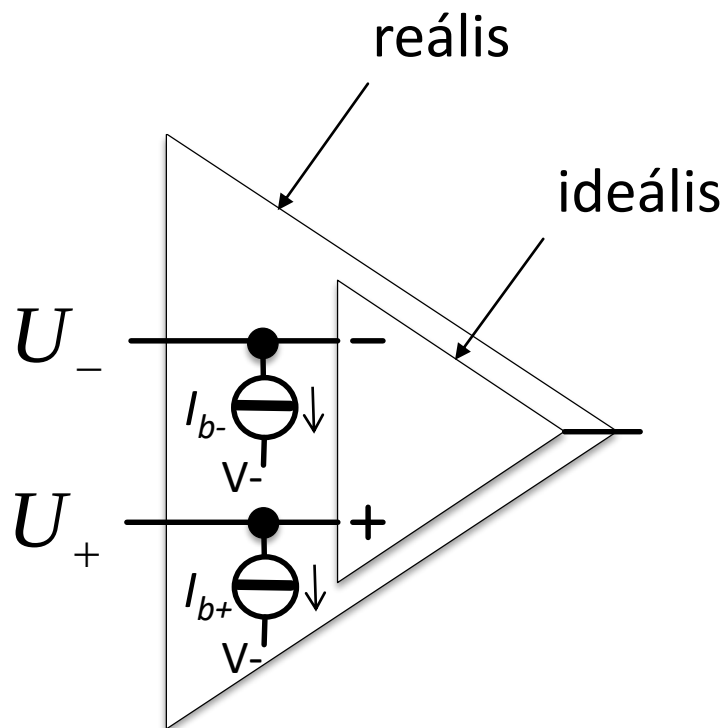
Bemenő áram

Bemenő áram

- ▶ Angolul: input bias current
- ▶ Befelé vagy kifelé folyó áramok
- ▶ Az irány a két bemenetre azonos
- ▶ Értékük nem teljesen azonos (kb. 10-30%)
 - ▶ különbségüket offszetáramnak hívjuk

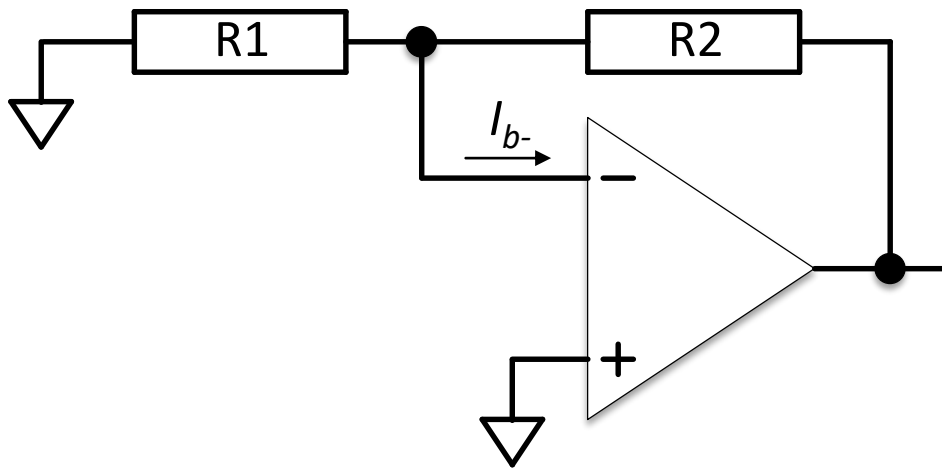


Bemenő áram modell



- ▶ A szuperpozíció tételével külön számítható a két áram hatása

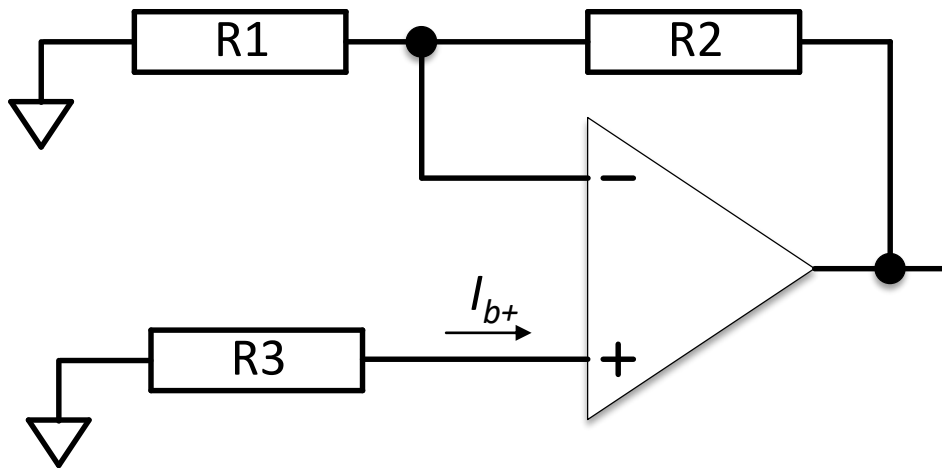
Negatív bemenet



$$U_{ki, I_{b-}} = R_2 I_{b-}$$

- ▶ A negatív bemenet virtuális földpont: 0V
 - ▶ Tehát R1-en nem folyhat áram
 - ▶ Így a teljes áram R2-n folyik.

Pozitív bemenet



$$U_+ = -R_3 I_{b+}$$

$$U_{ki} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_+$$

$$U_{ki, I_{b+}} = -\frac{R_1 + R_2}{R_1} R_3 I_{b+}$$

- ▶ A pozitív bemeneten feszültség lép fel
 - ▶ Ezt erősíti fel a neminvertáló erősítő
 - ▶ Befelé folyó áramnál negatív a feszültség
 - ▶ Ellentétes hatású, mint a negatív bemenetbe folyó áram

Összesítve

$$U_{ki, I_b} = R_v I_{b-} - \frac{1}{\beta} R_p I_{b+}$$

- ▶ I_{b-} : csak visszacsatoló körben levő ellenállás számít
- ▶ I_{b+} : a pozitív bemeneten levő eredő ellenállás és az erősítési tényező számít
- ▶ Ellentétes hatásúak: megfelelő választással csökkenthető a hatásuk

Bemeneti zaj

Zaj

- ▶ Elektronikus zaj, jelek véletlenszerű ingadozása
- ▶ A feszültség és áram is „zajos”
- ▶ Ok: véletlenszerű mikrofolyamatok, hőmérséklet
- ▶ Véletlenszerű?
 - ▶ „fehér zaj”
 - ▶ $1/f^2$ zaj
 - ▶ $1/f$ zaj

Zajforrások hatásának összegzése

- ▶ Erősíthetik, csökkenthetik egymást
- ▶ Statisztikus kezelés
 - ▶ Szórás (effektív érték)
 - ▶ Átlaguk nulla!
- ▶ A zajok teljesítménye összegződik, nem az amplitúdójuk
- ▶ A zajforrások felerősítve jelentkeznek a kimeneten
 - ▶ Ezek teljesítménye (négyzetes átlaga) összegzendő!

Bemeneti zajfeszültség

- ▶ A bemeneteken feszültségzaj jelenik meg
- ▶ Hasonlóan kezelhető, mint az offszetfeszültség
- ▶ A kimenetre jutása: $1/\beta$ szorzással

Bemeneti zajáram

- ▶ A bemeneteken zajáram jelenik meg
- ▶ Hasonlóan kezelhető, mint a bemeneti áram
- ▶ A kimenetre jutása:
 - ▶ A negatív bemeneti zajáram a visszacsatoló körben levő ellenállással szorzódik
 - ▶ A pozitív bemeneti zajáram a bemeneten levő eredő ellenállással és $1/\beta$ -val szorzódik

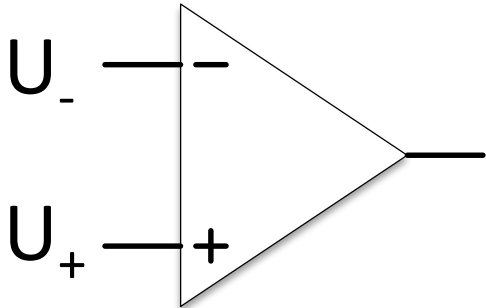
Ellenállások termikus zaja

Közös módusú elnyomás

Különbségképző erősítőknél

- ▶ Két jelnek a közös része:
 - ▶ Átlagértékük
- ▶ CMRR – common mode rejection ratio
 - ▶ ***Különbség erősítése osztva a közös rész erősítésével***
 - ▶ dB-ben szokás megadni
- ▶ A műveleti erősítő önmagában is ilyen!

Műveleti erősítő CMRR adata



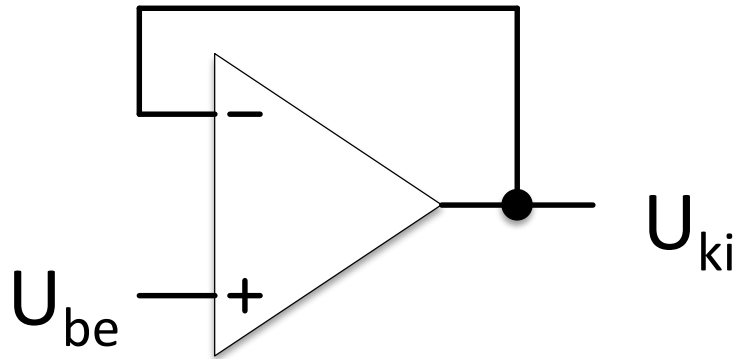
$$U_{ki} = A_V (U_+ - U_-) + A_{CM} \frac{(U_+ + U_-)}{2}$$

$$CMRR = \frac{A_V}{A_{CM}}$$

Milyen hatással van kapcsolásokra?

- ▶ Invertáló erősítő
 - ▶ A pozitív és negatív bemenet is 0V
 - ▶ Közös módusú jel: 0V! Nem lép fel hiba!
- ▶ Csak olyan kapcsolásnál lép fel, ahol a műveleti erősítő bemenetein a feszültség változik
 - ▶ Neminvertáló, különbségképző, követő, ...

Követő erősítő esetén

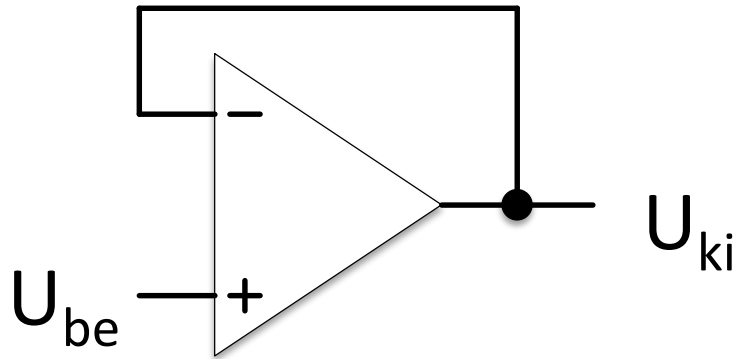


$$U_{ki} = A_V (U_+ - U_-) + A_{CM} \frac{(U_+ + U_-)}{2}$$

$$U_{ki} = A_V (U_{be} - U_{ki}) + A_{CM} \frac{(U_{be} + U_{ki})}{2} = A_V (U_{be} - U_{ki}) + A_{CM} U_{CM}$$

$$U_{ki} \left(1 + \frac{1}{A_V} \right) = U_{be} + \frac{U_{CM}}{CMRR}$$

Követő erősítő esetén



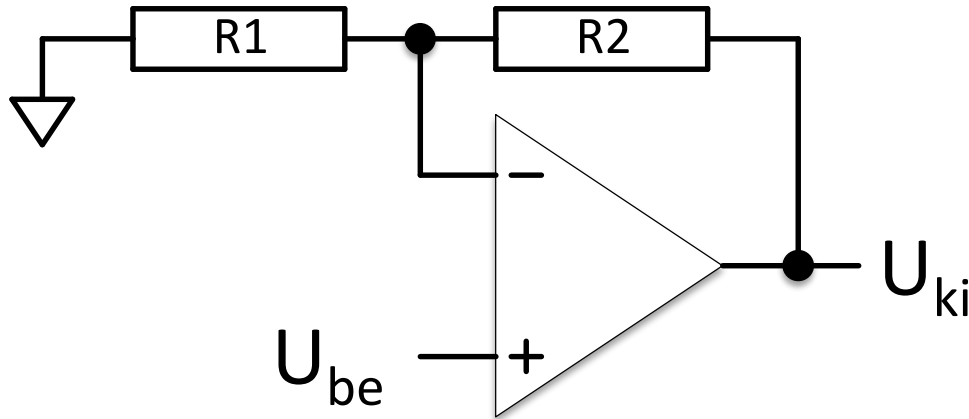
$$U_{ki} = U_{be} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_V}} + \frac{U_{CM}}{CMRR} \frac{1}{1 + \frac{1}{A_V}}$$

$$U_{CM} \approx U_{be}$$

$$1 + \frac{1}{A_V} \approx 1$$

$$U_{ki} \approx U_{be} \left(1 + \frac{1}{CMRR} \right)$$

Nem-invertáló erősítő



$$U_{ki} = A_V (U_+ - U_-) + A_{CM} \frac{(U_+ + U_-)}{2}$$

$$U_{ki} = A_V (U_{be} - \beta \cdot U_{ki}) + A_{CM} \frac{(U_{be} + \beta \cdot U_{ki})}{2} = A_V (U_{be} - \beta \cdot U_{ki}) + A_{CM} U_{CM}$$

$$U_{ki} \left(\beta + \frac{1}{A_V} \right) = U_{be} + \frac{U_{CM}}{CMRR}$$

Nem-invertáló erősítő

$$U_{ki} = U_{be} \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot A_v}} + \frac{U_{CM}}{CMRR} \frac{1}{\beta} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta \cdot A_v}}$$

$$U_{CM} \approx U_{be}$$

$$U_{ki} \approx U_{be} \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{1}{CMRR} \right)$$

$$U_{ki} \approx \frac{1}{\beta} U_{be} \left(1 + \frac{1}{CMRR} \right)$$

Differenciálerősítő

$$U_{ki} = A_V (U_+ - U_-) + A_{CM} \frac{(U_+ + U_-)}{2}$$

$$U_{ki} = A_V ((1 - \beta)U_2 - (\beta \cdot U_{ki} + (1 - \beta)U_1)) + A_{CM} U_{CM}$$

$$U_{ki} \beta \left(1 + \frac{1}{\beta \cdot A_V} \right) = (1 - \beta)(U_2 - U_1) + \frac{U_{CM}}{CMRR}$$

$$U_{ki} \approx \frac{1 - \beta}{\beta} (U_2 - U_1) + \frac{1 - \beta}{\beta} \frac{U_2}{CMRR}$$

Differenciálerősítő

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

$$U_0 = \frac{U_2 + U_1}{2}$$

$$U_2 = U_0 + \frac{\Delta U}{2}$$

$$U_{ki} \approx \frac{1-\beta}{\beta} \Delta U + \frac{1-\beta}{\beta} \frac{U_0}{CMRR} + \frac{1-\beta}{\beta} \frac{\frac{\Delta U}{2}}{CMRR}$$

Differenciálerősítő

$$U_{ki} \approx \frac{1-\beta}{\beta} \Delta U \left(1 + \frac{1}{2 \cdot CMRR} \right) + \frac{1-\beta}{\beta} \frac{U_0}{CMRR}$$

$$U_{ki} \approx \frac{1-\beta}{\beta} \Delta U + \frac{1-\beta}{\beta} \frac{U_0}{CMRR}$$

- ▶ Tehát a műveleti erősítő CMRR egyúttal a differenciálerősítő CMRR is.
- ▶ De csak Ideális ellenállások esetén!
- ▶ Leggyakrabban az ellenállások pontossága a döntő

Differenciálerősítő CMRR

► U1 és U2 erősítése kicsit más: G és $G+\Delta G$

$$U_{ki} = (G + \Delta G)U_2 - GU_1$$

$$U_{ki} = (G + \Delta G)\left(U_0 + \frac{\Delta U}{2}\right) - G\left(U_0 - \frac{\Delta U}{2}\right)$$

$$U_{ki} = GU_0 + \Delta GU_0 + G\frac{\Delta U}{2} + \Delta G\frac{\Delta U}{2} - GU_0 + G\frac{\Delta U}{2}$$

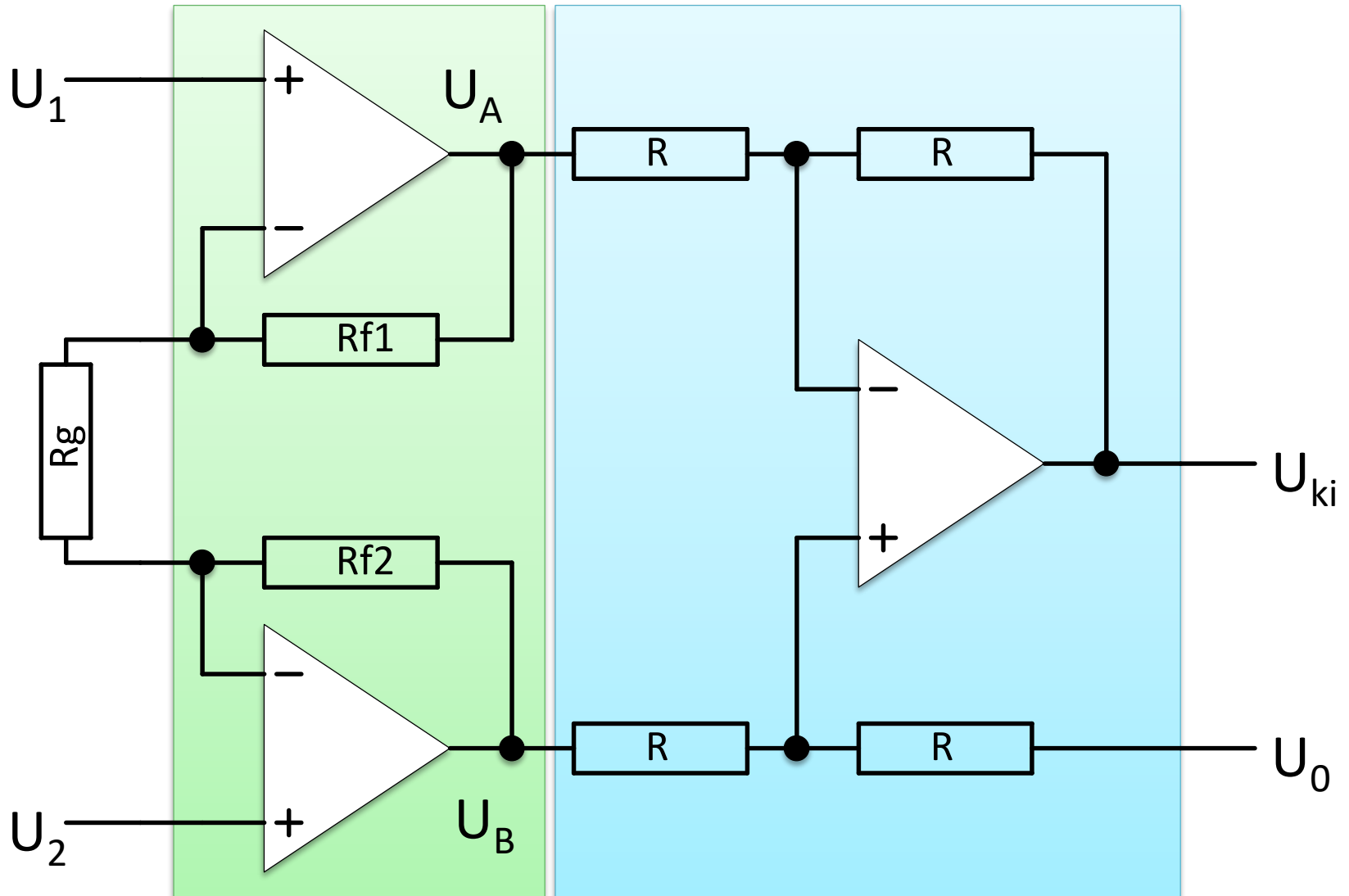
$$U_{ki} = \left(G + \frac{\Delta G}{2}\right)\Delta U + \Delta GU_0 \approx G\Delta U + \Delta GU_0$$

Differenciálerősítő CMRR

- ▶ Egy kis erősítéshiba is fellép
- ▶ CMRR:

$$CMRR = \frac{G}{\Delta G}$$

Műszererősítő CMRR?



Az erősítő két részből áll

- ▶ A második fokozat egy egyszeres különbségképző
- ▶ Ennek CMRR-je az ellenállások egyformaságán múlik
- ▶ Általában az ellenállások 0,01% mértékben térnek csak el (integrált erősítőknél)
- ▶ Ezzel 80dB-90dB CMRR érhető el
- ▶ Az első fokozat ezen változtat?

A második fokozat bemeneti jelei

$$U_B = U_0 + \frac{\Delta U}{2} + \frac{\Delta U}{R_g} R_{f2} = U_0 + \frac{\Delta U}{2} \left(1 + \frac{2R_{f2}}{R_g} \right)$$

$$U_A = U_0 - \frac{\Delta U}{2} - \frac{\Delta U}{R_g} R_{f1} = U_0 - \frac{\Delta U}{2} \left(1 + \frac{2R_{f1}}{R_g} \right)$$

A második fokozat bemeneti jelei

- ▶ A közös módusú jel: U_0
- ▶ Az első fokozat csak egyszeresen erősíti és nem számít R_{f1} és R_{f2} különbözősége!
- ▶ Különbségjelet az első fokozat sokszorosra erősítheti :

$$\Delta U \left(1 + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_g} \right)$$

A műszererősítő CMRR

$$\left(1 + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_g}\right) \cdot CMRR$$

- ▶ Tehát a második fokozat CMRR-t növeli erősítésszeresre
- ▶ Példa: AD623 garantált értékei (a tipikus +20dB)
 - ▶ CMRR (G=1): 80dB
 - ▶ CMRR (G=10): 100dB
 - ▶ CMRR (G=100): 120dB

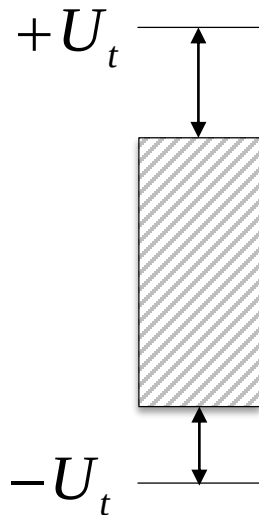
A műszererősítő további előnyei

- ▶ További előnyök a differenciálerősítőhöz képest
 - ▶ A bemenetek nagy impedanciások – igen kicsi a bemeneti áram
 - ▶ A bemenetek szimmetrikusak, egyforma terhelést jelentenek a jelforrásra
 - ▶ Az erősítés egyetlen ellenállással állítható
 - ▶ Kiválóan alkalmas mérőhidak erősítésére

Kimeneti jellemzők

Jeltartomány

- ▶ Output voltage range (output voltage swing)
- ▶ A kimeneti feszültségek tartománya korlátos
- ▶ A tápfeszültségek közötti:
 - ▶ $-U_t < U < +U_t$

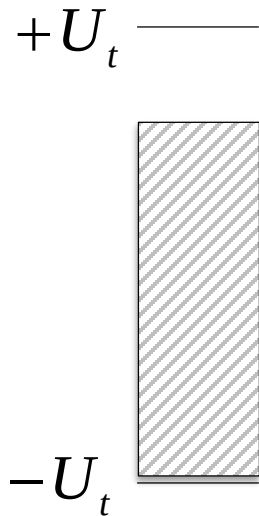


- aszimmetrikus
- pár mV-tól 1-2 Voltig terjedhet
- típustól függ
- terheléstől (áramtól) függ

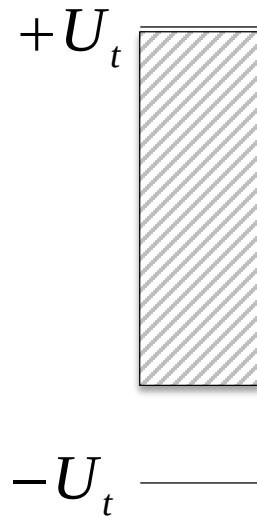
További tipikus esetek: táphoz közeli értékek

- ▶ Akár pár mV
- ▶ Egytápfeszültségű áramköröknél fontos

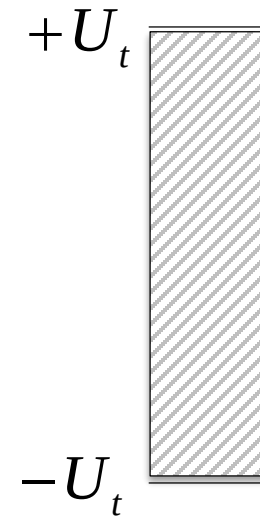
Single supply



Single supply



Rail-to-rail



Kimeneti áram

- ▶ Tipikusan 10mA-20mA
- ▶ Léteznek nagyobb kimeneti áramúak:
 - ▶ 50mA
 - ▶ 100mA
 - ▶ Akár 1A..10A
 - ▶ Laser driver, Peltier driver, coil driver, motor driver
- ▶ A kis áramúak lehetnek rövidzárvédettek
- ▶ A nagy áramúak lehetnek túlterhelés, túlmelegedés ellen védettek
- ▶ Ezeket nem vehetjük biztosra!

Jelváltozási sebesség

Kimeneti maximális jelváltozási sebesség

- ▶ Angolul: slew rate
- ▶ A kimenet nem változhat akármilyen gyorsan
- ▶ Pozitív és negatív irányban kicsit különböző lehet a maximális sebesség
- ▶ Minél nagyobb frekvenciájú és amplitúdójú a jel, annál inkább lehet hatása
- ▶ Jeltorzulást okozhat, a jel gyors szakaszait korlátozhatja
- ▶ Egységugrás esetén lineáris emelkedés
- ▶ Szinusz gyors szakaszain egyenes rész jelenik meg

Kimeneti maximális jelváltozási sebesség

- ▶ Tehát hiába nagy a sávszélesség, ez korlátozható. Szokás ezt **néha**
 - ▶ Torzításmentes sávszélességnek hívni – *distortion free bandwidth*
 - ▶ nagy jelű sávszélességnek hívni – *large signal bandwidth*
- ▶ Ha igen kicsi az amplitúdó, akkor csak az sávszélesség számít. Ezért **gyakran** ezt kisjelű sávszélességnek hívják – *small signal bandwidth*

Szemléltetés: impulzus átvitele (G=+1)

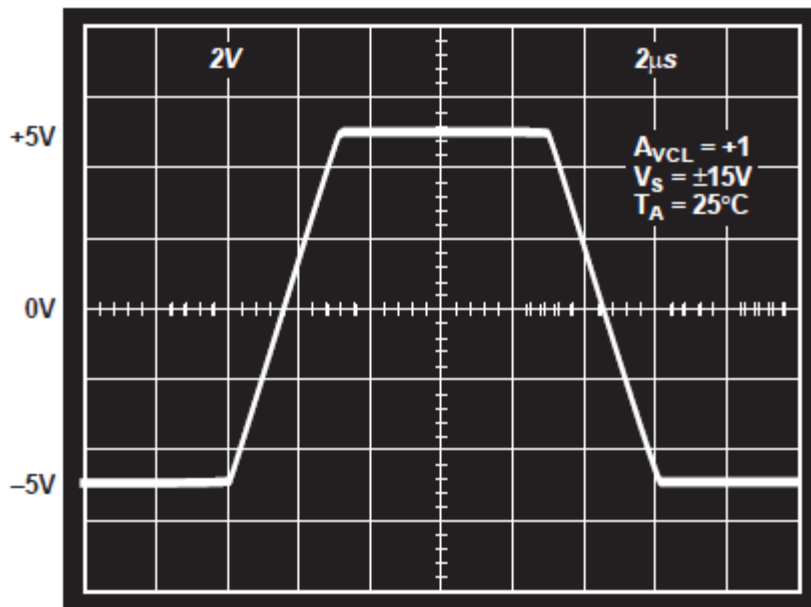
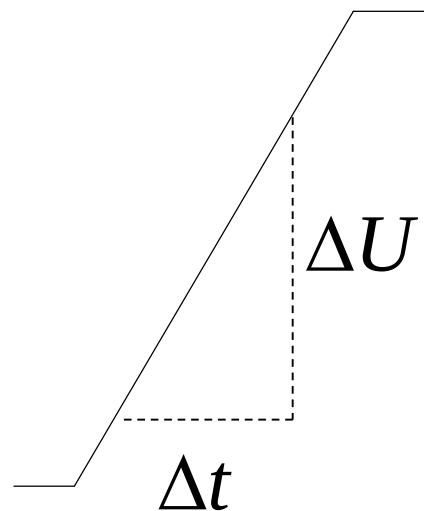


Figure 27. Large Signal Transient Response



$$S = \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

► Forrás: OP27 adatlap, www.analog.com

Hogyan számítható a hatása?

- ▶ Szinuszos jelet tekintünk
- ▶ A jel maximális sebessége a nullátmenetnél van
- ▶ Értéke függ a frekvenciától és amplitúdótól is

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi f t)$$

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot 2\pi \cos(2\pi f t)$$

$$\max\left(\frac{dx}{dt}\right) = A \cdot 2\pi \cdot f$$

A korlát: $A \cdot 2\pi \cdot f < S$

- ▶ A torzításmentesség felétele különböző esetekben
 - ▶ Adott A és f esetén S legalább mekkora legyen?
 - ▶ Adott S és f esetén A legfeljebb mekkora lehet?
 - ▶ Adott S és A esetén f legfeljebb mekkora lehet?

$$S > A \cdot 2\pi \cdot f$$

$$A < \frac{S}{2\pi \cdot f}$$

$$f < \frac{S}{2\pi \cdot A}$$

Tápfeszültségek

Tápfeszültségek értékei

- ▶ Elvileg elég egy értéket megadni: csak két tápfeszültségkivezetés van
- ▶ Szokás mégis $\pm$ megadása
 - ▶ utalás arra, hogy a GND ezek közt van
 - ▶ tehát a GND nem azonos a negatív tápfeszültséggel
- ▶ Példák:
 - ▶ $\pm 15V$
 - ▶ $5V$

Tápfeszültségek értékei

- ▶ Sokféle típus kapható
 - ▶ Gyakori: $\pm 15\text{V}$
 - ▶ Manapság gyakori: 5V
 - ▶ Akár $1,8\text{V}$ (elemes táplálás)
 - ▶ Akár $50\text{-}60\text{V}$
- ▶ Több paraméter is függhet a tápfeszültség értékétől (pl. nyílthurkú erősítés)

Nyugalmi áramfelvétel

- ▶ Nyugalmi: nulla kimeneti áramnál
- ▶ Tipikus érték: 2-3mA
- ▶ Kis fogyasztású, elemes áramkörök: 30uA..100uA
- ▶ Nagy teljesítményű áramköröknél akár pár 10 mA

Tápfeszültség-elnyomás – PSRR

- ▶ Power supply rejection ratio
- ▶ A tápfeszültség kicsit változhat
 - ▶ Terhelés változások
 - ▶ Elem lemerülése
 - ▶ Stabilizálási hiányosságok
- ▶ Ez hatással van a kimeneti feszültségre

$$PSRR = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_s}$$

Tápfeszültség-elnyomás – PSRR

- ▶ Minél jobb tápfeszültséget használjunk
 - ▶ Szokás a többszörös stabilizálás (sorba kötött stabilizátorok)
- ▶ Csatolásmentesítő kondenzátorok
- ▶ A PSRR növekvő frekvencián csökken
- ▶ Tipikus értéke 70-90dB